



Fisheries and Oceans
Canada

Science

Pêches et Océans
Canada

Sciences

CSAS

Canadian Science Advisory Secretariat

Research Document 2009/068

SCCS

Secrétariat canadien de consultation scientifique

Document de recherche 2009/068

**Passive acoustic monitoring during
seismic surveys**

**Le monitoring par acoustique passive
pendant les relevés sismiques**

Yvan Simard

Fisheries and Oceans Canada, Maurice Lamontagne Institute, 850 Route de la Mer, P.O. Box. 1000
Mont-Joli, Québec G5H 3Z4, Canada

This series documents the scientific basis for the evaluation of aquatic resources and ecosystems in Canada. As such, it addresses the issues of the day in the time frames required and the documents it contains are not intended as definitive statements on the subjects addressed but rather as progress reports on ongoing investigations.

Research documents are produced in the official language in which they are provided to the Secretariat.

This document is available on the Internet at:

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Les documents de recherche sont publiés dans la langue officielle utilisée dans le manuscrit envoyé au Secrétariat.

Ce document est disponible sur l'Internet à:

ISSN 1499-3848 (Printed / Imprimé)
ISSN 1919-5044 (Online / En ligne)
© Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2009
© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2009

Canada

Correct citation for this publication:

La présente publication doit être citée comme suit :

Simard, Y. 2009. Passive acoustic monitoring during seismic surveys. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2009/068, iv + 22 p.

Simard, Y. 2009. Le monitoring par acoustique passive pendant les relevés sismiques. MPO. Doc. de rech. 2009/068, iv + 22 p.

ABSTRACT

The possibility of using passive acoustic monitoring (PAM) to detect marine mammals in the exclusion zone around the airgun array during seismic surveys is explored for the range of sounds produced by marine mammals and the ambient noise conditions during the survey. The probability of detection with a towed hydrophone array is estimated for representative mysticete and odontocete sounds, using published source levels, propagation losses, shipping noise and seismic pulse levels in the corresponding frequency band. This investigation shows that the efficiency of such PAM approach during seismic survey is severely constrained by the high noise levels at the hydrophones. As expected, this is mostly affecting the low-frequency sounds and infrasounds. However, when the airguns are not active, the detection ranges of the tested sounds always exceeded a safety radius of 500 m, assuming ideal conditions, which may not always materialise. During the firing of the airguns, this was not the case.

RÉSUMÉ

La possibilité d'utiliser le monitoring par acoustique passive (PAM) pour détecter des mammifères marins dans la zone d'exclusion autour d'un réseau des canons à air lors de relevés sismiques est explorée pour une gamme de sons produits par les mammifères marins ainsi que les conditions de bruit ambiant pendant le relevé. La probabilité de détection au moyen d'un réseau linéaire d'hydrophones remorqué est estimée pour des sons représentatifs de mysticètes et d'odontocètes, en utilisant les niveaux à la source publiés, les pertes par propagation et les niveaux de bruit du navire et de l'impulsion sismique dans la bande de fréquence correspondante. Cette investigation montre que l'efficacité d'une telle approche PAM lors des relevés sismiques est sévèrement limitée par les forts niveaux de bruit aux hydrophones. Tel que prévu, ceci affecte particulièrement les sons de basses fréquences et les infrasons. Toutefois, lorsque les canons à air ne sont pas actifs, les portées de détection des sons testés ont toujours excédé un rayon de zone de sécurité de 500 m, en postulant des conditions idéales, ce qui peut ne pas toujours être le cas. Lorsque les canons à air se déchargent, ce n'était pas le cas.

INTRODUCTION

Because visual detection of whales is limited to daytime and good visibility conditions, passive acoustic monitoring is sometime proposed as a promising alternative for detecting non-silent whales around an operating seismic ship, notably during poor visibility periods [5-7, 13, 16, 28, 29]. This possibility is examined below for the towed hydrophone array approach used so far.

The limitations of PAM for achieving such mitigation task that are generally evoked are, in decreasing severity levels, that:

- a) only "vocal" animals can be detected;
- b) only a fraction of the vocal animals can be reliably detected;
- c) only a fraction of the detected sounds can be identified by a species name;
- d) only a fraction of the detected sounds can be reliably ranged [13, 28, 30]

Therefore, the probability to effectively acoustically range a marine mammal in the targeted monitored area at time t is the joint probability:

$$P(t)_{r,m} = P_a \cdot P_b \cdot P_c \cdot P_d \quad (1)$$

where, $P_a \dots P_d$ are the probabilities associated with the corresponding above limitations.

Adding to the problem are the facts that:

- a wide frequency band has to be monitored to cover the large spectrum of marine mammal sounds;
- some sounds produced by some species may not be known, neither their seasonal, diel or other temporal variability as function of interactions

INTRODUCTION

Parce que la détection visuelle des baleines est limitée aux conditions de bonne visibilité pendant le jour seulement, le monitoring par acoustique passive est parfois proposé comme une alternative prometteuse pour détecter les baleines non silencieuses autour d'un navire de prospection sismique, notamment lors des périodes de faible visibilité [5-7, 13, 16, 28, 29]. Cette possibilité est examinée ci-dessous pour l'approche de la chaîne d'hydrophones remorquée utilisée à ce jour.

Les limitations des méthodes PAM généralement soulevées pour accomplir cette fonction sont, en ordre décroissant de sévérité, que :

- a) seuls les animaux "vocaux" peuvent être détectés;
- b) une fraction seulement des animaux vocaux peut être effectivement détectée;
- c) une fraction seulement des sons détectés peut être identifiée à l'espèce;
- d) la distance des sons détectés peut être estimée que pour une fraction de ceux-ci [13, 28, 30]

Conséquemment, la probabilité de mesurer la distance d'un mammifère marin dans la zone de monitoring ciblée au temps t est la probabilité combinée :

$$P(t)_{r,m} = P_a \cdot P_b \cdot P_c \cdot P_d \quad (1)$$

où, $P_a \dots P_d$ sont les probabilités associées aux limitations ci-dessus.

A ces difficultés s'ajoutent les faits que:

- une large bande de fréquences doit être prise en compte pour couvrir la large gamme de sons des mammifères marins;
- des sons produits par certaines espèces peuvent être inconnus, ainsi que leur variabilité saisonnière, diurne ou à d'autres fréquences en fonction d'interactions entre individus, de la taille

between individuals, group sizes, activity, including responses to noise disturbance;

- survey ship noise can mask low-frequency sounds produced by baleen whales;
- present simple PAM equipment and associated signal processing software may be insufficiently mature to robustly and automatically realize the detection, classification and localization task;
- PAM sometimes monitors a different area than the targeted exclusion zone, which is centered at the airgun array, notably when PAM is implemented on escort ships;
- PAM localization generally requires repeated contacts with the same source and the estimated position error may be relatively large; consequently it remains uncertain if the whale is in or out of the exclusion zone;
- no standard procedures, training and guidelines are available for real-time PAM implementation during seismic surveys [7, 11, 13, 16, 24, 28]

P_a : When $P_a = 0$ or P_a tends toward 0, PAM is useless. Some species may not vocalize frequently enough to warrant PAM as an effective mitigation tool during seismic survey. The gray whales feeding at Sakhalin Island during seismic exploration appear to have corresponded to that case [8].

P_b : When the sounds are not loud enough, or their frequency characteristics do not allow significant propagation ranges, such as the high-frequency clicks (limited to a few hundreds m), P_b becomes very low. Clicks are also highly directional, which results in large variations in detected signal strength depending on the clicking direction of the animal [30]. P_b

des groupes, de leur activité, incluant leur réponse à des perturbations par le bruit;

- le bruit du navire prospecteur peut masquer les sons de basses fréquences produits par les baleines à fanons;
- la performance des équipements PAM simples actuels et leurs logiciels de traitement de signaux pourrait être insuffisante pour réaliser automatiquement avec robustesse la tâche de détection, classification et localisation;
- les méthodes PAM parfois surveillent une zone différente de la zone d'exclusion ciblée, qui est centrée au réseau de canons à air, notamment quand le suivi par PAM est implémenté sur les navires escortes;
- la localisation par PAM requiert généralement des contacts répétés avec la même source et l'erreur de localisation peut être relativement grande; conséquemment il demeure incertain si la baleine se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'exclusion;
- aucune procédure standard, formation et lignes directrices ne sont disponibles pour une implémentation PAM lors de relevés sismiques [7, 11, 13, 16, 24, 28]

P_a : Quand $P_a = 0$ or P_a tend vers 0, les méthodes PAM sont inutiles. Certaines espèces peuvent ne pas vocaliser suffisamment fréquemment pour garantir une utilisation efficace des méthodes PAM comme mesure de mitigation lors des relevés sismiques. Les baleines grises s'alimentant à l'Île Sakhalin lors de prospections sismiques semblent avoir correspondu à ce cas de figure [8].

P_b : Quand les sons ne sont pas suffisamment forts, ou que leur caractéristiques fréquentielles ne permettent pas leur propagation sur des distances appréciables, tels les clics de hautes fréquences (limités à quelques centaines de m), P_b devient très faible. Les clics sont aussi fortement directionnels, ce qui résulte en de larges variations d'intensité du signal détecté

can also be very low or equal to zero if the noise at the receiver is higher than the intensity of the sound to detect (signal to noise ratio (SNR) ≤ 0 dB)^[31]. This is unfortunately the general case when monitoring the exclusion zone around the airgun array, as shown below.

P_c: The identification of the caller (i.e. P_c) is sometime strongly desired, for instance when some species such as the listed species at risk are of special concern while others are not^[5], or when groups and multiple speakers are present. Although some sounds are known to be signing for several species, there are several other sounds for which the species is unknown or which could be produced by more than one species, such as whistles and clicks for example.

P_d: The probability of precisely localizing the sounds (i.e. P_d) depends on the degree of precision associated to the terms of the localization equation, such as the hydrophone absolute and relative 3D locations, the sound speed, the measured time difference of arrivals^[15, 22, 23]. The error for a given detection can sometime be too large for any reliable localization of the source. A cloud of uncertainty is always associated to any estimated position^[15, 18, 23]. The track of a series of detections from the same source is likely generally needed for reasonable localization accuracy.

OPERATIONAL CONDITIONS

Marine mammal sounds cover a wide frequency band from infrasounds of a few Hz to ultrasounds exceeding 100000 Hz^[2, 12] (Fig. 1b). Their durations vary from $\sim 1 \times 10^{-3}$ s for echolocation clicks to $> 1 \times 10^3$ s for songs. Their known source levels (SL) also vary widely, from ~ 108 to 223 dB re 1 μ Pa @ 1 m^[10]. Detecting and classifying such a broad range of sounds represent a tremendous challenge for any automated, semi-automated or supervised acoustic

en fonction de la direction d'émission de l'animal^[30]. P_b peut aussi être très faible ou égal à zéro si le bruit au récepteur est plus fort que l'intensité du son à détecter (rapport signal à bruit (RSB) ≤ 0 dB)^[31]. Ceci est malheureusement généralement le cas lors du monitoring de la zone d'exclusion autour du réseau de canons à air.

P_c: L'identification de la source (i.e. P_c) est parfois fortement souhaitée, notamment lorsque des espèces telles les espèces à risque sont particulièrement préoccupantes alors que d'autres ne le sont pas^[5], ou quand des groupes et des locuteurs multiples sont présents. Bien que des sons sont signants pour plusieurs espèces, il existe plusieurs autres sons pour lesquels on ne connaît pas l'espèce ou qui peuvent être produits par plus d'une espèce, tels les sifflements et les clics par exemple.

P_d: La probabilité de localiser les sons précisément (i.e. P_d) dépend du degré de précision associé aux termes de l'équation de localisation, tels les positions absolues et relatives des hydrophones en 3D, la vitesse du son, les mesures de différence de temps d'arrivée^[15, 22, 23]. L'erreur pour une détection donnée peut parfois être trop grande pour une quelconque localisation fiable de la source. Un nuage d'incertitude est toujours associé à toute position estimée^[15, 18, 23]. Le pistage d'une série de détections de la même source est vraisemblablement généralement requis pour une localisation raisonnablement exacte.

CONDITIONS OPÉRATIONNELLES

Les sons des mammifères marins couvrent une large bande de fréquences allant des infrasons de quelques Hz jusqu'aux ultrasons excédant 100000 Hz^[2, 12] (Fig. 1b). Leur durée varie de $\sim 1 \times 10^{-3}$ s pour les clics d'écholocation à $> 1 \times 10^3$ s pour les chants. Leurs niveaux à la source (SL) varient également considérablement, de ~ 108 à 223 dB re 1 μ Pa @ 1 m^[10]. Détecter et classifier une telle étendue de sons représentent un défi colossal pour quelque

system. Figure 1b summarizes this large sound spectrum that PAM systems have to cope with.

INFRASOUNDS

The strong infrasounds of blue and fin whales last from 1 to ~15 s (group 1, Fig. 1b). Their high energy ($SL \approx 190$ dB re $1\mu\text{Pa}$ @ 1 m) and long wavelength with low coefficients of absorption (α , Fig. 1c) allow them to propagate over very long distances, of several tenths of km on continental shelves [e.g. 21]. Their probability of being detected by a PAM system in a given location depends on their received level relative to the noise at the receiver (i.e. SNR) ^[20, 21].

If the receiver is placed close to the exclusion zone, such as in the case of a PAM linear hydrophone array towed behind the survey ship (e.g. Fig. 2, from [17]), it will be severely exposed to the noise radiated by the towing ship (Fig. 1a, from [27]). At these infrasonic frequencies, the noise from a large ship can reach 180 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1 m ^[27], or ~170 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1 m at a 30° angle with the horizontal ^[1]. At the hydrophone location, for ex. 300 m from the ship (Fig. 2), ship noise level would then be 120.5 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, assuming free field propagation (i.e. spherical spreading loss) (Fig. 3). Blue and fin whale infrasounds of 190 dB re $1\mu\text{Pa}$ @ 1 m could then be detected over a range of only ~3 km, excluding a blind sector around and in front of the ship where the sounds are masked by the strong ship noise crossing their propagation path (Fig. 3, white lines enclosing the ship). This however assumes no masking at low frequencies by strumming, vibration and flow noise at the PAM hydrophone array, which is unlikely at operating sailing speeds of seismic surveys.

soit le système acoustique automatisé, semi-automatisé ou supervisé. La figure 1b résume ce large spectre de sons auquel les systèmes PAM doivent faire face.

INFRASONS

Les forts infrasons des rorquals bleu et commun durent de 1 à ~15 s (groupe 1, Fig. 1b). Leur énergie élevée ($SL \approx 190$ dB re $1\mu\text{Pa}$ @ 1 m) et leur grande longueur d'onde, dont le coefficient d'absorption (α , Fig. 1c) est faible, permettent leur propagation sur de longues distances, de plusieurs dizaines de km sur les plateaux continentaux [e.g. 21]. Leur probabilité d'être détectés par un système PAM à un endroit donné dépend de leur niveau à la réception relativement au bruit au récepteur.

Si le récepteur est placé près de la zone d'exclusion, comme dans le cas d'une chaîne d'hydrophones touée à l'arrière du navire de prospection (e.g. Fig. 2, d'après [17]), il sera sévèrement exposé au bruit rayonné par le navire remorquant (Fig. 1a, d'après [27]). A ces fréquences infrasoniques, le bruit d'un grand navire peut atteindre 180 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1 m ^[27], ou ~170 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1 m à un angle de 30° par rapport au plan horizontal ^[1]. A l'hydrophone, situé par ex. à 300 m du navire (Fig. 2), le niveau du bruit rayonné par le navire serait 120.5 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, en assumant une propagation non contrainte (i.e. pertes par dispersion sphérique) (Fig. 3). Les infrasons des rorquals bleu et communs, de 190 dB re $1\mu\text{Pa}$ @ 1 m à la source, pourraient alors être détectés jusqu'à seulement 3 km, à l'exclusion d'un secteur aveugle à l'avant du navire où les sons sont masqués par le fort bruit du navire qui entrave leur chemin de propagation (Fig. 3, lignes blanches sertissant le navire). Ceci assume toutefois qu'il n'y a pas de masquage aux basses fréquences par le bruit d'écoulement autour de la chaîne d'hydrophones, ce qui est peu probable à la vitesse de navigation lors des relevés sismiques.

When the seismic pulse is emitted from the airgun array used in [17], the airgun noise (dotted lines in Fig. 1a, from [17]) in a 500-m safety radius exceeds 161 dB re 1 μ Pa, and is 165.5 dB re 1 μ Pa at the towed PAM hydrophone array. This gives a detection range of 17 m, which means zero range for a 20-m long whale (Fig. 4). Reverberation of the seismic pulse also can reduce the time window when whales can be detected.

LOW-FREQUENCY SOUNDS

Low-frequency mysticetes sounds (group 2 in Fig. 1b), such as bowhead moans, are weaker than the above strong infrasounds^[10]. They should therefore propagate over smaller ranges and be masked by lower noise levels. Using the same reasoning as above for the infrasounds, and the published ship and seismic pulse noise levels from [1, 17] at typical moan frequencies, we get a maximum detection range of ~1.7 km for bowhead moans (Fig. 5). Again, a significant blind radius is found around the ship, with an extending sector in sailing direction.

In contrast to the infrasounds, several sounds in this frequency band have significant time-frequency content that can be exploited by processing algorithms to enhance the SNR, by ~10 dB. Applying such processing gain, we now get a maximum detection range for bowhead moans of 5.3 km, and the blind sector at the ship is reduced (Fig. 6). When the seismic pulse is emitted, the detection range becomes smaller than 300 m (Fig. 7). Because of seismic pulse reverberations, the detection range in between two pulses would vary between 300 m and 5.3 km in ideal conditions.

Lors de l'émission de l'impulsion sismique d'un réseau de canons à air tel que celui utilisé dans [17], le bruit des canons à air (lignes pointillées à la Fig. 1a, d'après [17]) dans un rayon de 500 m excède 161 dB re 1 μ Pa, et est 165.5 dB re 1 μ Pa aux hydrophones de la chaîne remorquée. Ceci donne une portée de détection de 17 m, ce qui signifie une distance égale à zéro pour une baleine de 20 m de longueur (Fig. 4). La réverbération de l'impulsion sismique peut aussi réduire la fenêtre de temps pendant laquelle les baleines peuvent être détectées.

SONS DE BASSES FRÉQUENCES

Les sons de basses fréquences des mysticètes (groupe 2 à la Fig. 1b), tels les beuglements des baleines boréales, sont de plus faibles intensité que les forts infrasons exposés ci-dessus^[10]. Ils doivent donc se propager sur de plus petites distances et être masqués par de plus faibles niveaux de bruit. En utilisant le même raisonnement que ci-dessus pour les infrasons, et les données publiées sur les niveaux de bruit des navires et de l'impulsion sismique de [1, 17] pour les fréquences des beuglements typiques, on obtient une distance maximale de détection de ~1.7 km pour les beuglements de baleine boréale (Fig. 5). Ici encore, un rayon aveugle notable est présent autour du navire et s'étend dans la direction de navigation.

Au contraire des infrasons, plusieurs sons dans cette bande de fréquence ont un contenu tempo-fréquentiel qui peut être exploité par des algorithmes pour rehausser le RSB, par ~10 dB. En appliquant un tel gain de traitement, on obtient maintenant une distance maximale de détection de 5.3 km pour un beuglement de baleine boréale, et le secteur aveugle près du navire est réduit (Fig. 6.). Quand l'impulsion sismique est émise, la distance de détection devient plus petite que 300 m (Fig. 7). Suite aux réverbérations du signal sismique, la portée de détection entre deux émissions varierait entre 300 m et 5.3 km dans des conditions idéales.

HIGH-FREQUENCY SOUNDS

High-frequency sounds (group 3, Fig. 1b) include whistles, pulse tones and other sounds, such as the various communication sounds found in the large beluga repertoire, whose fundamental frequencies are generally between 1.5 and 3.5 kHz^[3, 4]. The source levels of these sounds in the wild are still largely unknown but likely generally below 160 dB re 1 μ Pa @ 1 m^[2, 10]. A 3-kHz beluga whistle, with a SL of 160 dB re 1 μ Pa @ 1m, processed with a 10-dB gain detection algorithm, would be detected at a maximum range of 54 km given the low ship noise at this frequency^[1] (Fig. 8). The blind sector at the ship would also be very narrow. During the seismic pulse, the maximum detection range would be 3 km (Fig. 9). Assuming a whistle SL of 140 dB re 1 μ Pa @ 1 m, the detection ranges would shrink by a factor of 10, to 5.4 km and 300 m, corresponding to those above estimated for bowhead moans.

ULTRASOUNDS

Odontocete clicks (groups 4-6, Fig. 1b) are very sharp, high intensity transients, which can be easily detected in recordings from several signal processing approaches [e.g. 9, 14, 25]. However, except for the sperm whale click (group 4 in Fig. 1b), which has a lower frequency range compared to the clicks of the other species, clicks are affected by increasing sound absorption with frequency (Fig. 1c). Their propagation is limited to a few hundreds m^[31], for example ~400 m for the ~120 kHz harbour porpoise clicks (group 6, Fig. 1b)^[26]. Several clicks have a mid-frequency component besides their main ultrasonic frequency, as illustrated in Fig. 1b (groups 4 and 5). However, to detect ultrasound clicks, the PAM system must cover this high-frequency band, which is not the case with standard 44.1 and 48 kHz audio sampling systems. Moreover, clicks are highly directional^[2, 30]. They have a

SONS DE HAUTES FRÉQUENCES

Parmi les sons de hautes fréquences (groupe 3, Fig. 1b), on retrouve des sifflements, des tons pulsés et d'autres sons, tels les sons de communication variés du grand répertoire des bélugas, dont les fréquences fondamentales sont généralement entre 1.5 et 3.5 kHz^[3, 4]. Les niveaux à la source de ces sons en nature sont encore largement inconnus, mais probablement généralement inférieurs à 160 dB re 1 μ Pa @ 1 m^[2, 10]. Un sifflement de béluga de 3 kHz, de SL de 160 dB re 1 μ Pa @ 1 m, détecté par un algorithme de gain de traitement de 10 dB, serait détecté jusqu'à une distance de 54 km, vu le faible bruit rayonné par le navire à cette fréquence^[1] (Fig. 8). Le secteur aveugle près du navire serait aussi très étroit. Pendant l'émission sismique, la portée maximale de détection serait de 3 km (Fig. 9). En assumant un SL de 140 dB re 1 μ Pa @ 1 m pour le sifflement, les portées de détection seraient réduites par un facteur 10, soit à 5.4 km et 300 m, ce qui correspond aux portées estimées ci-dessus pour les beuglements de baleine boréale.

ULTRASONS

Les clics d'odontocètes (groupes 4-6, Fig. 1b) sont des impulsions très courtes, de forte intensité, qui peuvent être facilement détectées dans des enregistrements à partir de plusieurs approches de traitement [e.g. 9, 14, 25]. Toutefois, à l'exception des clics de cachalots (groupe 4 dans la Fig. 1b), de gamme de fréquences plus basse comparée aux clics des autres espèces, les clics sont affectés par l'accroissement de l'absorption du son avec la fréquence (Fig. 1c). Leur propagation est limitée à quelques centaines de m^[31], par exemple ~400 m pour les clics de ~120 kHz des marsouins communs (groupe 6, Fig. 1b)^[26]. Plusieurs clics ont des composantes de fréquences moyennes en plus de leur fréquence ultrasonique principale, tel qu'illustré dans la Fig. 1b (groupe 4 et 5). Toutefois, pour détecter les clics ultrasoniques, un système PAM doit couvrir cette bande de hautes fréquences, ce

low energy outside of the main acoustic beam, therefore a low probability of being detected there. If the click is not detected by at least two hydrophones of the array, localization then becomes impossible.

At the click frequency band, both the ship and seismic noise is much reduced — although not nil — and so is the masking effect of noise. Furthermore, the high processing gain associated to click detectors significantly enhances the probability of detection. This may be the reason why clicks are the most frequent sounds detected by towed arrays experimented during seismic surveys^[13, 17].

CONCLUSION

Operational use of PAM to detect marine mammals in the exclusion zone during airgun seismic surveys appears to be rare from a literature search. The documentation of the actual possibilities and limitations of the PAM systems used during seismic operations is lacking. Results published so far indicate very limited detections, both in number and species diversity^[13, 17], lower than from visual detections, in contrast to published efficiency comparisons of these two approaches applied from coastal locations. Reasons for such poor performance of PAM methods, otherwise renown for their efficiency and large detection range, are numerous, as listed above. The present examination shows that this is largely due to their actual implementation, using a towed array located in close range of two strong noise sources, the towing ship and the pulse of a seismic airgun array. The fact that the targeted monitoring area, the exclusion zone, is impacted by strong fluctuating wideband noise^[17], adds to the difficulty of efficiently

qui n'est pas le cas des systèmes d'échantillonnage audio standard de 44.1 et 48 kHz. De plus, les clics sont très directionnels^[2, 30]. Leur énergie est faible en dehors du faisceau acoustique principal, ce qui rend leur détection moins probable dans ces directions. Si le clic n'est pas détecté par au moins deux hydrophones de la chaîne, la localisation devient impossible.

Dans la bande de fréquences des clics, tant le bruit du navire que celui de l'impulsion sismique sont considérablement réduits — bien que non nuls —, conséquemment le masquage l'est aussi. De plus, le fort gain de traitement associé aux détecteurs de clics augmente significativement la probabilité de détection. Ceci pourrait expliquer pourquoi les clics sont les sons les plus fréquemment détectés par les réseaux linéaires d'hydrophones remorqués expérimentés lors de relevés sismiques^[13, 17].

CONCLUSION

L'utilisation opérationnelle de méthodes PAM pour détecter les mammifères marins dans la zone d'exclusion pendant les relevés sismiques par canons à air semble rare d'après une recherche de la littérature. La documentation des possibilités et des limitations des systèmes PAM utilisés lors d'opérations sismiques fait défaut. Les résultats publiés à ce jour indiquent un nombre très limité de détectations, tant en quantité qu'en diversité d'espèces^[13, 17], plus faible que les détectations visuelles, ce qui contraste avec les comparaisons d'efficacité de ces deux approches à partir de stations côtières. Les raisons de cette pauvre performance des méthodes PAM, par ailleurs renommées pour leur efficacité et leur longue portée de détection, sont nombreuses, tel que listées ci-dessus. La présente investigation montre que cela est largement dû à leur mode d'implémentation, utilisant un réseau linéaire d'hydrophones remorqué à proximité de deux importantes sources de bruit, le navire remorquant et l'impulsion sismique d'un réseau de canons à air. Le

using PAM for detecting whales in this area. Nevertheless, the use of a PAM towed-array system for detecting non silent whales in the exclusion zone before starting firing the airguns appears to be feasible in ideal conditions, with the likely exception of very low-frequency sounds, because of the important flow noise in this band, which was not considered here (Table 1). Their precise localization is however a more difficult task, which requires tracking the same sound source for some time. When the airguns are firing, the efficiency of such PAM system for continuously monitoring whales in the exclusion zone is reduced, considering the terms of equation (1) (Table 1).

The rapidly evolving PAM new technology is generating a growing number of activities and publications in this research field, such as the proceedings of the four biennial "International workshops on the detection, classification and localization of marine mammals from passive acoustics" held since 2003. However, the challenges of covering the wide spectrum of all marine mammal sounds are still numerous, from both the hardware and the software points of views. The diversity of present PAM applications for monitoring the exclusion zone during seismic surveys appears to be very narrow, and limited to towed arrays. This approach will likely never provide the full benefits of PAM technology, because of the severe conditions of the acoustic environment where it is implemented.

Deploying different PAM tools, in better environment conditions, for tracking soniferous whales from a much larger area and assessing their probability of ever

fait que l'aire ciblée pour le monitoring, la zone d'exclusion, soit affectée par un fort bruit large bande fluctuant^[17], ajoute à la difficulté d'utiliser efficacement les systèmes PAM pour détecter des baleines dans cette région. Néanmoins, l'utilisation d'un système PAM par réseau linéaire remorqué pour détecter les baleines non silencieuses dans la zone d'exclusion avant de débiter les impulsions des canons à air semble faisable dans des conditions idéales, à l'exception vraisemblable des sons de très basses fréquences à cause du bruit d'écoulement concentré dans cette bande, qui n'a pas été considéré ici (Tableau 1). Leur localisation précise est toutefois une tâche plus difficile, qui requiert le pistage d'une même source sonore pendant un certain temps. Lorsque les canons à air se déchargent, l'efficacité de tels systèmes PAM pour le monitoring continu des baleines dans la zone d'exclusion est réduite, considérant les termes de l'équation (1) (Tableau 1).

L'évolution rapide des nouvelles technologies PAM génère un nombre croissant d'activités et de publications dans ce champ de recherche, tels les comptes-rendus des quatre "Ateliers internationaux sur la détection, classification et la localisation de mammifères marins par acoustique passive" qui ont eu lieu depuis 2003. Toutefois, les défis sont nombreux pour couvrir le large spectre de tous les sons des mammifères marins, tant du point de vue de l'équipement que celui du logiciel. La diversité des applications actuelles des méthodes PAM pour le monitoring de la zone d'exclusion pendant les relevés sismiques apparaît être très réduite, et limitée au remorquage de réseaux linéaires d'hydrophones. Cette approche ne livrera vraisemblablement jamais les bénéfices complets des technologies PAM, à cause des sévères conditions de l'environnement sonore où elles sont implémentées.

Le déploiement d'outils PAM différents, dans de meilleures conditions environnementales, pour pister les baleines sonifères dans une plus grande aire et

entering in the exclusion zone, would likely provide a more efficient mitigation tool to use during seismic surveys. It could also assist visual observers for early detection and tracking whales in the far field. Such systems could involve a contribution from the escort ships slowly towing PAM hydrophone arrays, and eventually for deploying more evolved autonomous technologies, tuned to automatically detect and transmit the locations of the targeted whales in real-time to the seismic ship, such as the WOW system in development by [19] or other similar network approaches with surface links^[18]. Further PAM development should definitely be encouraged to significantly enhance the present limited use of PAM as a mitigation tool during seismic surveys. This should include the development and experimentation of new technologies, including sensors, their platforms and telecommunication, as well as improvement of real-time detection and identification algorithms under noisy conditions, including robust localization and tracking.

estimer leur probabilité d'éventuelles intrusions dans la zone d'exclusion, fournirait vraisemblablement un meilleur outil de mitigation à utiliser pendant les relevés sismiques. Cela pourrait aussi assister les observateurs visuels pour la détection précoce et le pistage des baleines dans le champ lointain. De tels systèmes pourraient impliquer la contribution de navires escortes remorquant lentement des réseaux linéaires d'hydrophones, et éventuellement déployant des technologies autonomes plus évoluées, réglées pour détecter automatiquement et transmettre en temps réel au navire sismique la position des baleines ciblées, tel le système WOW en développement par [19] ou d'autres approches en réseau similaires avec liens de surface^[18]. Le développement des méthodes PAM devrait être définitivement encouragé pour augmenter significativement la présente exploitation limitée des systèmes PAM comme outil de mitigation pendant les relevés sismiques. Ceci devrait inclure le développement et l'expérimentation de nouvelles technologies, incluant les capteurs, leurs plateformes et la télécommunication, ainsi que l'amélioration des algorithmes de détection et d'identification dans des conditions de bruit, incluant la localisation et le pistage robustes.

REFERENCES

- [1] Arveson P.T., and Vendittis D.J. 2000. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *J. Acoust. Soc. Am.* 107: 118-129.
- [2] Au, W.L., and Hastings, M.C. 2008. Principles of marine bioacoustics. Springer. DOI: 10.1007/978-0-387-78365-9
- [3] Bédard, C. 2006. Détection automatique des vocalises de bélugas (*Delphinapterus leucas*) du Saint-Laurent, analyse du patron temporel et détermination de la bande de fréquences dominante. Thèse M.Sc. ISMER, Université du Québec à Rimouski. 89 pp.
- [4] Bédard, C., and Simard, Y. 2006. Automated detection of white whale (*Delphinapterus leucas*) vocalizations in St. Lawrence estuary and occurrence pattern. *Can. Acoust.* 34(3): 84-85.
- [5] DFO, 2007. Mitigation of seismic noise in the marine environment: Statement of Canadian practice. Fisheries and Oceans Canada. 8 p.
- [6] Jasny, M. 2006. Mitigating the impacts of airgun surveys: current policy and best practice. In Impacts of seismic survey activities on whales and other marine biota. International Workshop, 6-7 Sept. Dessau, Germany. pp. 47-51. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de>
- [7] JNCC, 2004. Guidelines for minimising acoustic disturbance to marine mammals from seismic surveys. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK. http://www.jncc.gov.uk/pdf%5Cseismic_survey_guidelines_200404.pdf
- [8] Johnson, S.R., Richardson, W.J., Yazvenko, et al. 2007. A western gray whale mitigation and monitoring program for a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia. *Environ. Monit. Assess.* 134: 1-19. DOI: 10.1007/s10661-007-9813-0
- [9] Kandia, V, and Stylianou, Y. 2008 Detection of clicks based on group delay. *Can. Acoust.* 36(1): 48-54.
- [10] Kuperman, W.A., and Roux, P. 2007. Underwater acoustics. In Rossing, T.D. (ed.) Handbook of acoustics. Springer, N.Y. pp. 149-201.
- [11] Lurton, X. Antoine, L. 2007. Analyse des risques pour les mammifères marins liés à l'emploi des méthodes acoustiques en océanographie. Rapport final. Ifremer DOP/CB/NSE/AS/07-07. Available at: <http://www.ifremer.fr/doc/2007/rapport-2390.pdf>
- [12] Mellinger, D.K., Stafford, K.M., Moore, S.E., et al. 2007. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4): 36-45.
- [13] Robinson, N.E, Chaudry, F., Clark, N.M., et al. 2008. Is passive acoustic monitoring during seismic surveys a valuable tool for mitigation? *Bioacoustics* 17: 265-267.

-
- [14] Roch, M.A., Soldevilla, M.S., Hoenigman, R. et al. 2008. Comparison of machine learning techniques for the classification of echolocation clicks from three species of odontocetes. *Can. Acoust.* 36(1): 41-47.
- [15] Roy, N., Simard, Y., and Rouat, J. 2008. Performance of three acoustical methods for localizing whales in the Saguenay—St. Lawrence Marine Park. *Can. Acoust.* 36(1): 160-164.
- [16] Pavan, G. 2005. Recommendations and guidelines to address the issue of the impact of anthropogenic noise on marine mammals in the Mediterranean Sea: toward a permit system for the ACCOBAMS area. Report SC3/Doc 20 prepared for the 3rd ACCOBAMS Scientific Committee, Cairo, 14-17 May 2005.
- [17] Potter, J.R., Thillet, M., Douglas, C., et. al. 2007. Visual and passive acoustic marine mammal observations and high-frequency seismic source characteristics recorded during a seismic survey. *IEEE J. Ocean. Eng.* 32: 469-483.
- [18] Simard, Y., and Roy, N. 2008. Detection and localization of blue and fin whales from large-aperture autonomous hydrophone arrays: a case study from the St. Lawrence estuary. *Can. Acoust.* 36(1): 104-110.
- [19] Simard, Y., Bahoura, M., Park, C.W., et al. 2006. Development and experimentation of a satellite buoy network for real-time acoustic localization of whales in the St. Lawrence. MTS-IEEE OCEANS'06 – Boston, IEEE, Piscataway, NJ, USA. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.307052 p. 1-6.
- [20] Simard, Y., Roy, N., and Gervaise, C. 2006. Shipping noise and whales: World tallest ocean liner vs largest animal on earth. MTS-IEEE OCEANS'06 – Boston. IEEE, Piscataway, NJ, USA. DOI : 10.1109/OCEANS.2006.307053 p. 1-6.
- [21] Simard, Y., Roy, N., and Gervaise, C. 2008. Passive acoustic detection and localization of whales: effects of shipping noise in Saguenay—St. Lawrence Marine Park. *J. Acoust. Soc. Am.* 123(6): 4109-4117.
- [22] Spiesberger, J.L. 2004. Geometry of locating sounds from differences in travel time: Isodichrons. *J. Acoust. Soc. Am.* 112: 3046-3052.
- [23] Spiesberger, J.L. and Wahlberg, M. 2002. Probability density functions for hyperbolic and isodichronic locations. *J. Acoust. Soc. Am.* 112: 3046-3052.
- [24] Stone, C. J., 2001. Marine mammal observations during seismic surveys in 1999. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK. No. 316
- [25] Tiemann, C.O. 2008. Three-dimensional single-hydrophone tracking of a sperm whale demonstrated using workshop data from The Bahamas. *Can. Acoust.* 36(1): 67-73.
- [26] Villadsgaard A., Wahlberg M., and Tougaard, J. 2006. Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. *J. Exp. Biol.* 210: 56-64
- [27] Wales, S.C., and Heitmeyer R.M. 2002. An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 111: 1212-1231.
-

-
- [28] Weir, C.R., and Dolman, S.J. 2007. Comparative review of the regional marine mammal mitigation guidelines implemented during industrial seismic surveys, and guidance towards a worldwide standard. *J. Int. Wild. Law and Policy*. 10: 1-27.
- [29] Gillespie, D., Gordon, J., Mchugh, R., McLaren, D., Mellinger, D., Redmond, P., Thode, A., Trinder, P., and Deng, X. Y. _2008_. "PAMGUARD: Semiautomated, open source software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans," *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol.30, Pt. 5.
- [30] Ward, J., Morrissey, R., Moretti, D., DiMarzio, N., Jarvis, S., Johnson, M., Tyack, P. and White, C. 2008. Passive acoustic detection and localization of *Mesoplodon densirostris* (Blainville's beaked whale) vocalizations using distributed bottom-mounted hydrophones in conjunction with a Digital Tag (DTAG) recording. *Can. Acoust.* 36: 60-66.
- [31] Zimmer, W., Harwood, J., Tyack, P., Johnson, M., and Madsen, P. 2008. "Passive acoustic detection of deep diving beaked whales," *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2823–2832.

Table 1. Summary of estimated detection ranges under spherical spreading loss and the assumed noise and processing conditions for the cases tested (see text)

Sound type	Airguns not firing	Airguns firing
Infrasounds Blue and fin whale, SL = 190 dB re 1 μ Pa @ 1m	3.0 km	17 m
Low-frequency Bowhead moan, SL = 170 dB re 1 μ Pa @ 1m with processing gain = 10 dB	1.7 km 5.3 km	300 m
High-frequency Beluga whistle, SL = 160 dB re 1 μ Pa @ 1m with processing gain = 10 dB	54 km	3000 m
Beluga whistle, SL = 140 dB re 1 μ Pa @ 1m with processing gain = 10 dB	5.4 km	300 m
Ultrasounds Clicks with high processing gain	~safety radius	~safety radius

Tableau 1. Résumé des portées de détection sous des pertes par dispersion sphérique et les conditions de bruit et de traitement postulées pour les cas testés (voir texte)

Type de sons	Canons à air non actifs	Canons à air en décharge
Infrasons Rorqual bleu et commun, SL = 190 dB re 1 μ Pa @ 1m	3.0 km	17 m
Basses-fréquences Beuglement de baleine boréale, SL = 170 dB re 1 μ Pa @ 1m avec gain de traitement = 10 dB	1.7 km 5.3 km	300 m
Hautes-fréquences Sifflement de béluga, SL = 160 dB re 1 μ Pa @ 1m avec gain de traitement = 10 dB	54 km	3000 m
Sifflement de béluga, SL = 140 dB re 1 μ Pa @ 1m avec gain de traitement = 10 dB	5.4 km	300 m
Ultrasons Clics avec fort gain de traitement	~rayon de sécurité	~ rayon de sécurité

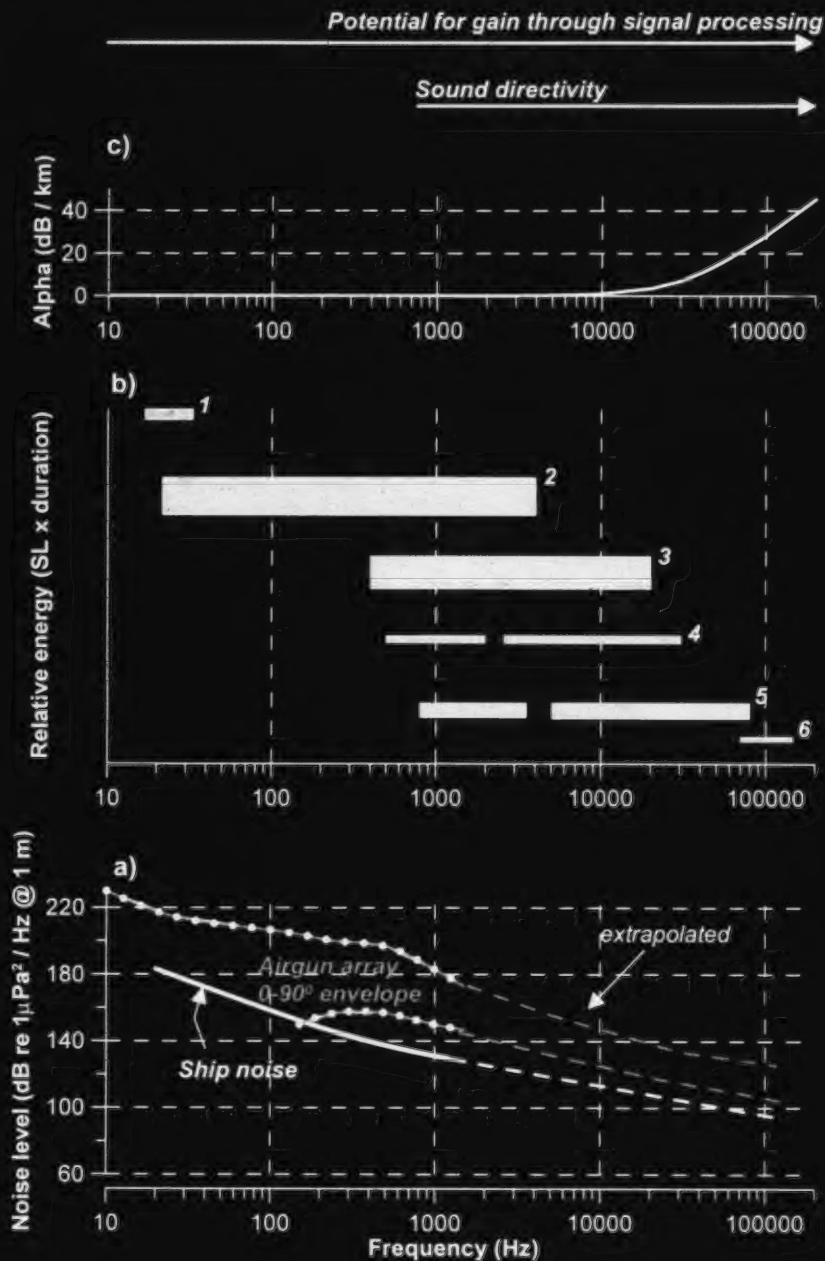


Figure 1. Schematic representation of the acoustic context of using PAM as a potential tool for detecting whales in the exclusion zone during an airgun seismic survey (see text).

Figure 1. Représentation schématisée du contexte acoustique de l'utilisation de méthodes PAM comme outil potentiel pour la détection de baleines dans la zone d'exclusion pendant des relevés sismiques par canons à air (voir texte).

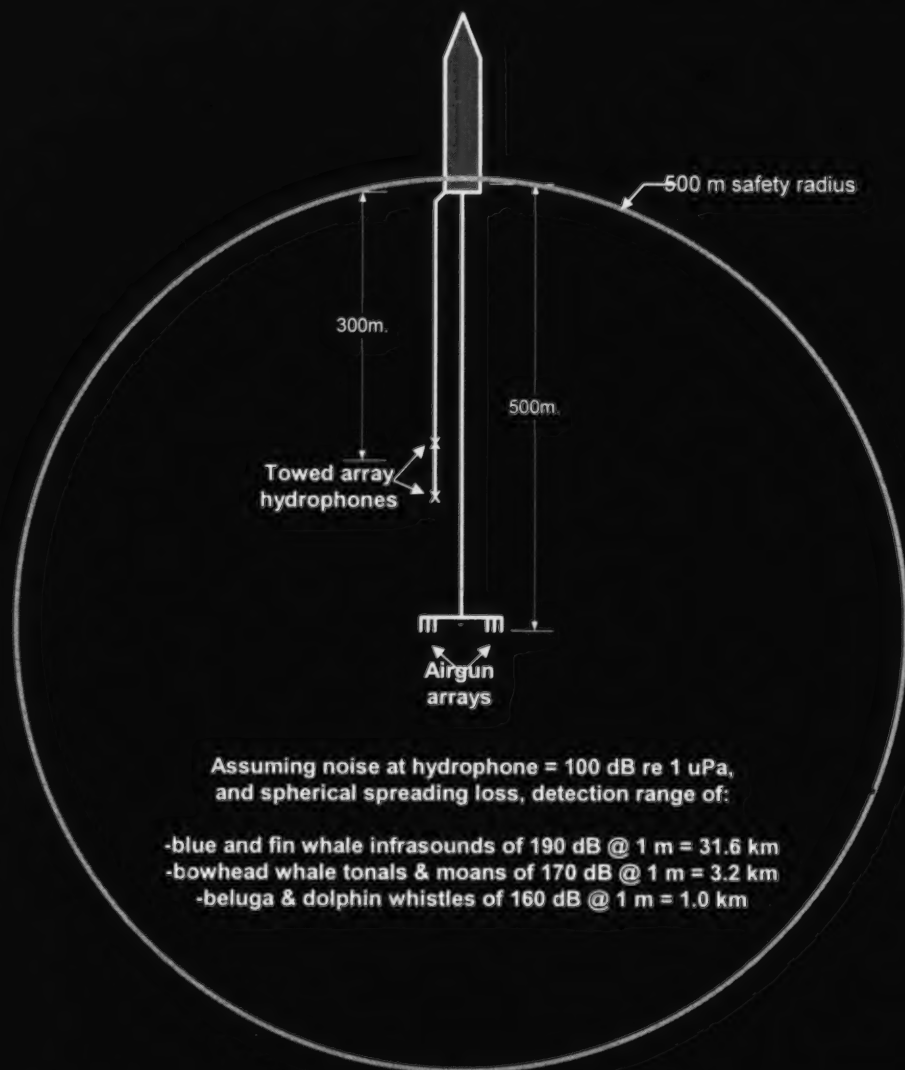


Figure 2. Example of a PAM configuration used for detecting whales in the exclusion zone during an airgun seismic survey (adapted from [17]).

Figure 2. Exemple d'une configuration PAM utilisée pour la détection des baleines dans la zone d'exclusion pendant un relevé sismique par canons à air (adapté de [17]).

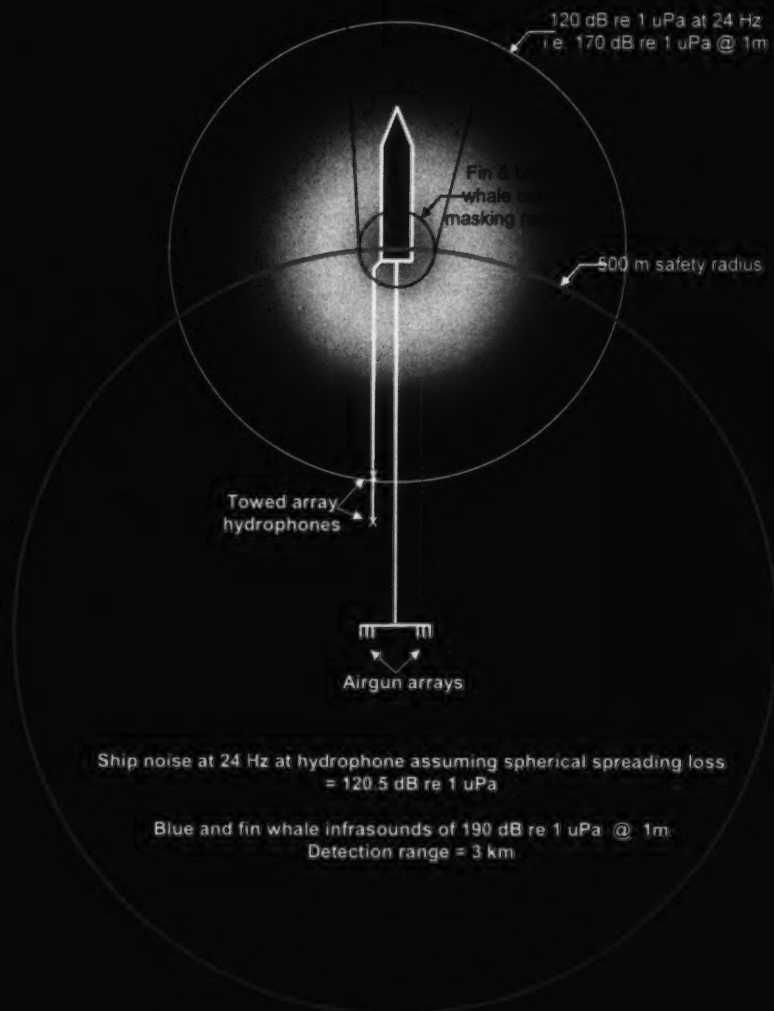


Figure 3. Example of the effect of ship noise on the detection of blue and fin whales infrasounds in the exclusion zone during an airgun seismic survey from a PAM configuration as illustrated in Fig. 2.

Figure 3. Exemple de l'effet du bruit du navire sur la détection des infrasons des rorquals bleus et communs dans la zone d'exclusion lors d'un relevé sismique par canons à air à l'aide d'une configuration PAM comme illustré à la Fig. 2.

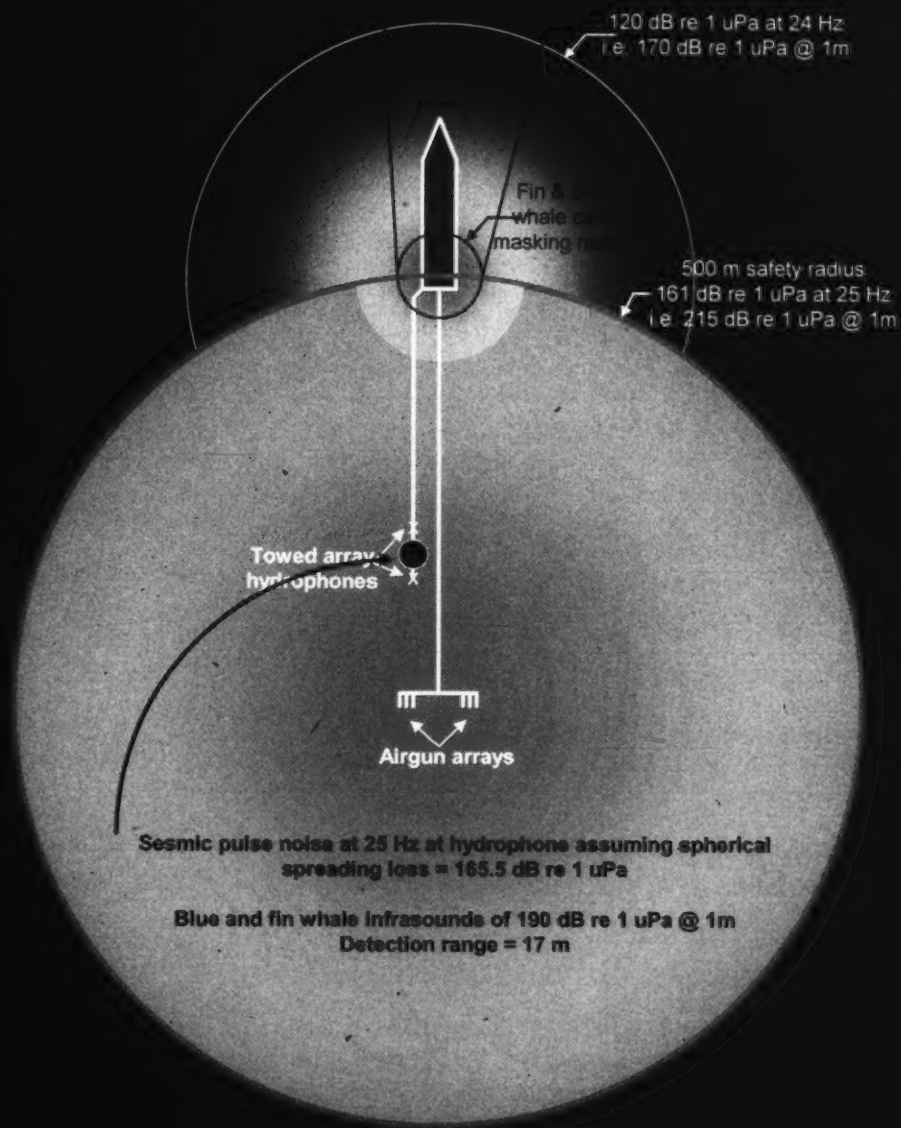


Figure 4. As Fig. 3 but for the effect of airgun noise

Figure 4. Comme à la Fig. 3 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

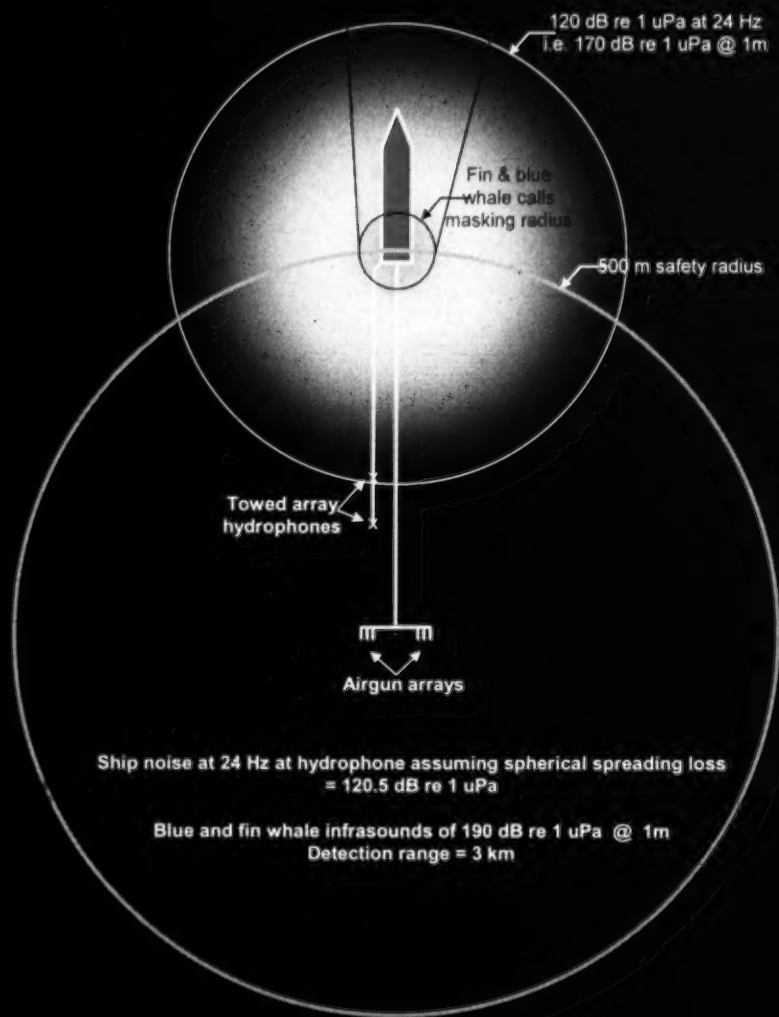


Figure 3. Example of the effect of ship noise on the detection of blue and fin whales infrasounds in the exclusion zone during an airgun seismic survey from a PAM configuration as illustrated in Fig. 2.

Figure 3. Exemple de l'effet du bruit du navire sur la détection des infrasons des rorquals bleus et communs dans la zone d'exclusion lors d'un relevé sismique par canons à air à l'aide d'une configuration PAM comme illustré à la Fig. 2.

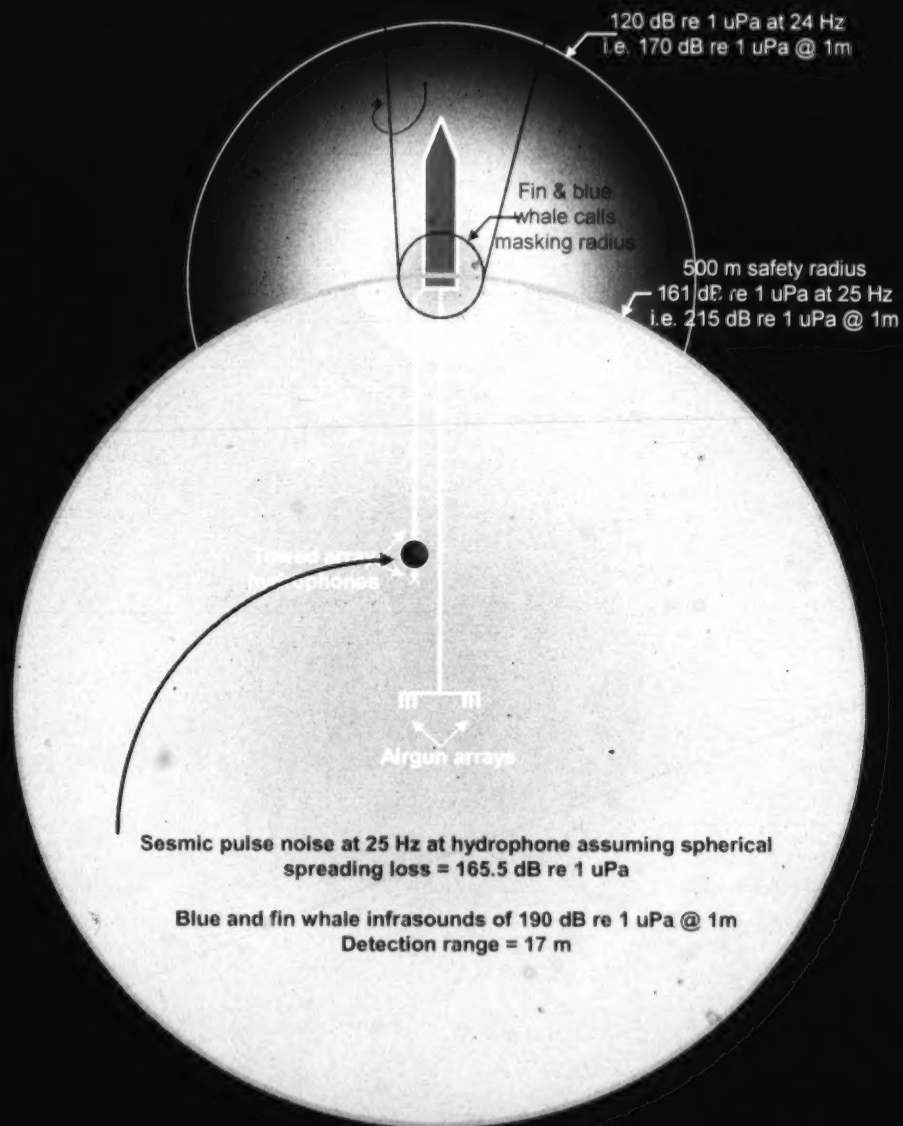


Figure 4. As Fig. 3 but for the effect of airgun noise.

Figure 4. Comme à la Fig. 3 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

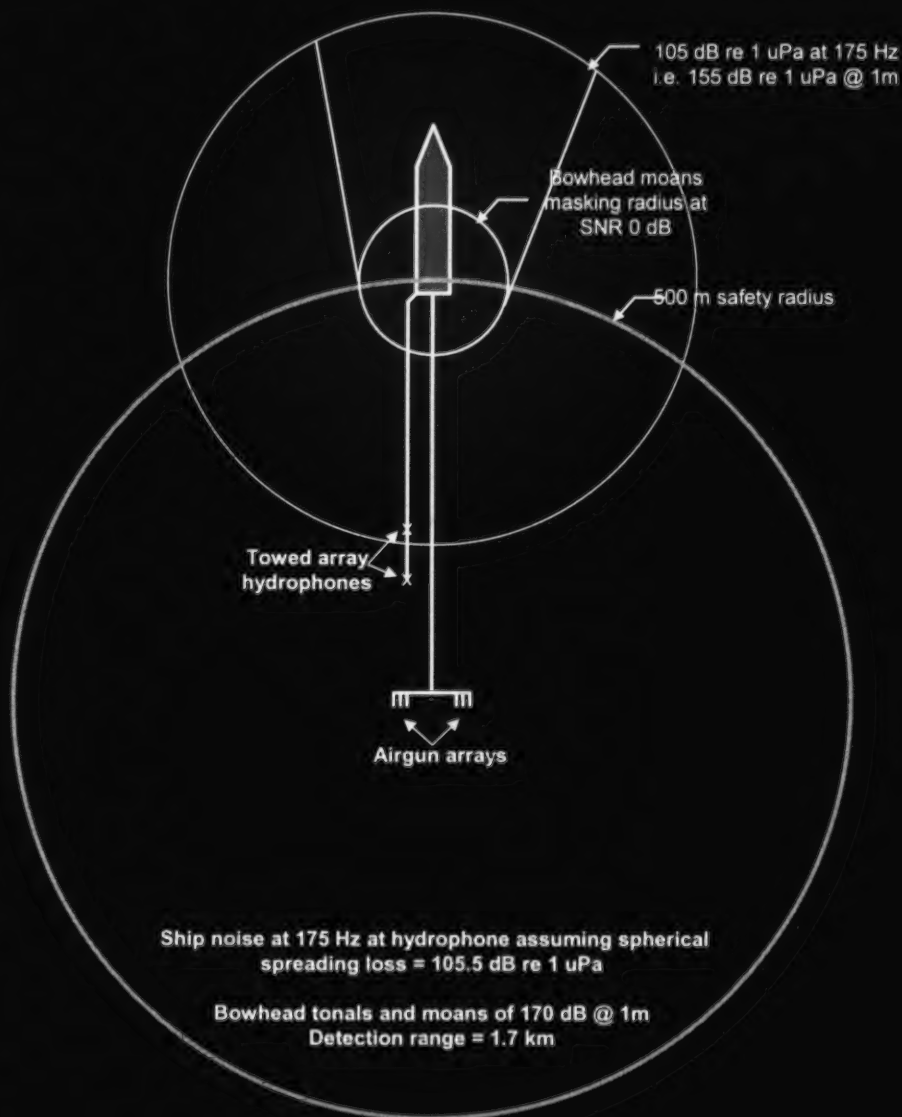


Figure 5. Example of the effect of ship noise on the detection of bowhead tonals and moans in the exclusion zone during an airgun seismic survey from a PAM configuration as illustrated in Fig. 2.

Figure 5. Exemple de l'effet du bruit du navire sur la détection des sons tonaux et beuglements des baleines boréales dans la zone d'exclusion lors d'un relevé sismique par canons à air à l'aide d'une configuration PAM comme illustrée à la Fig. 2.

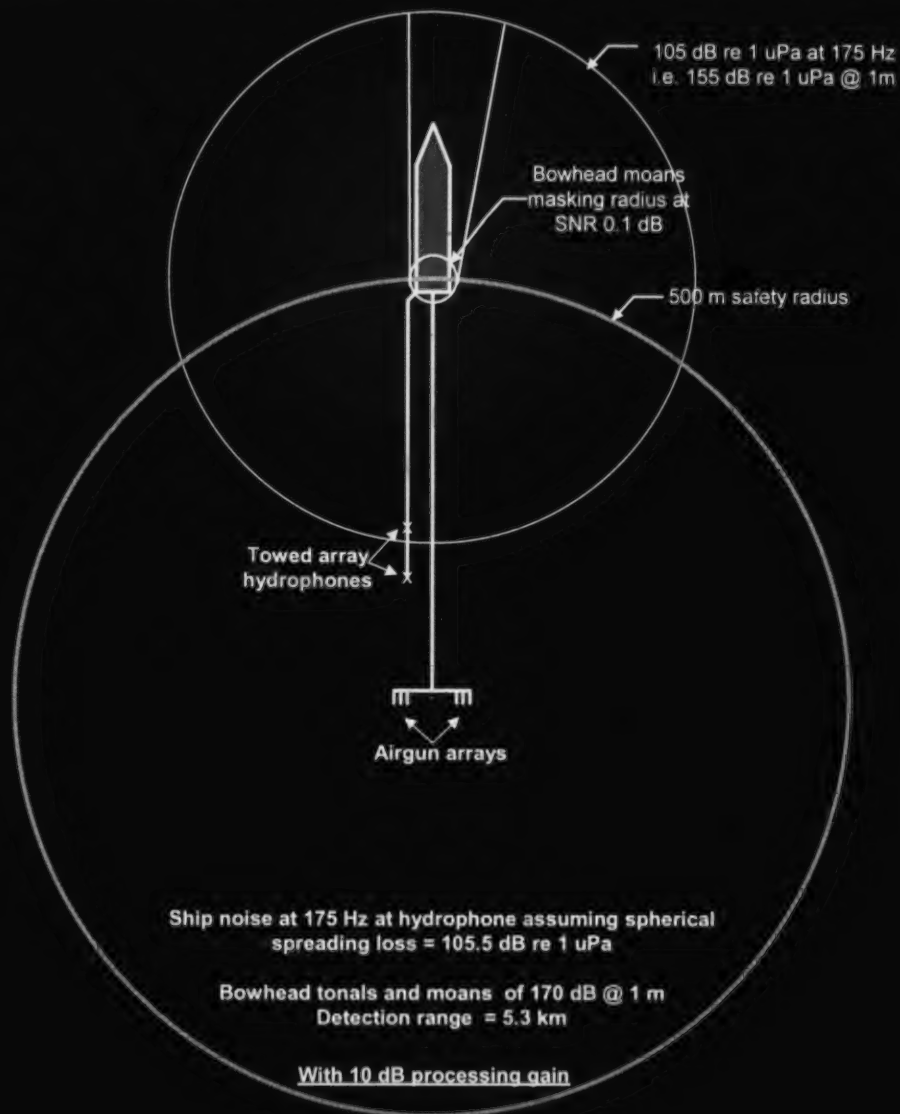


Figure 6. As in Fig. 5 but with 10 dB processing gain.

Figure 6. Comme à la Fig. 5 mais avec un gain de traitement de 10 dB.

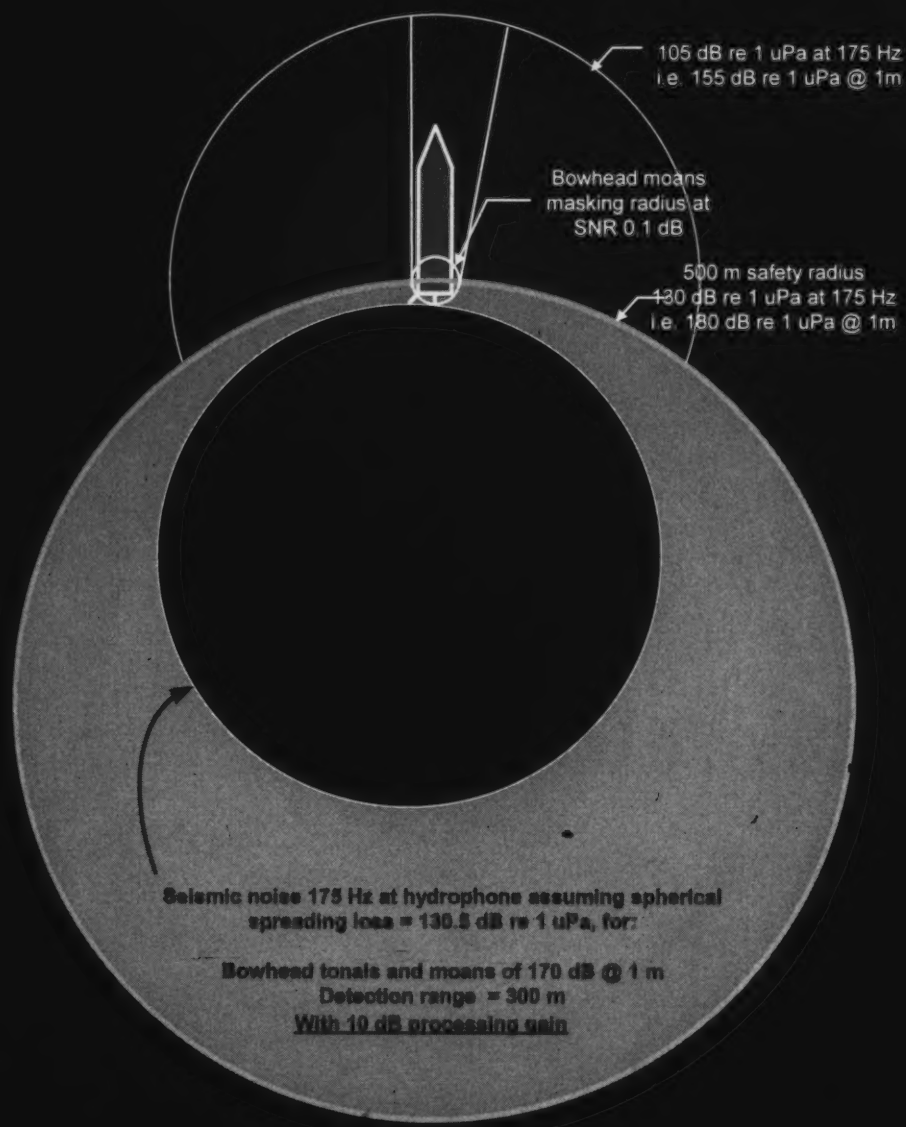


Figure 7. As in Fig. 6 but for the effect of airgun noise.

Figure 7. Comme à la Fig. 6 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

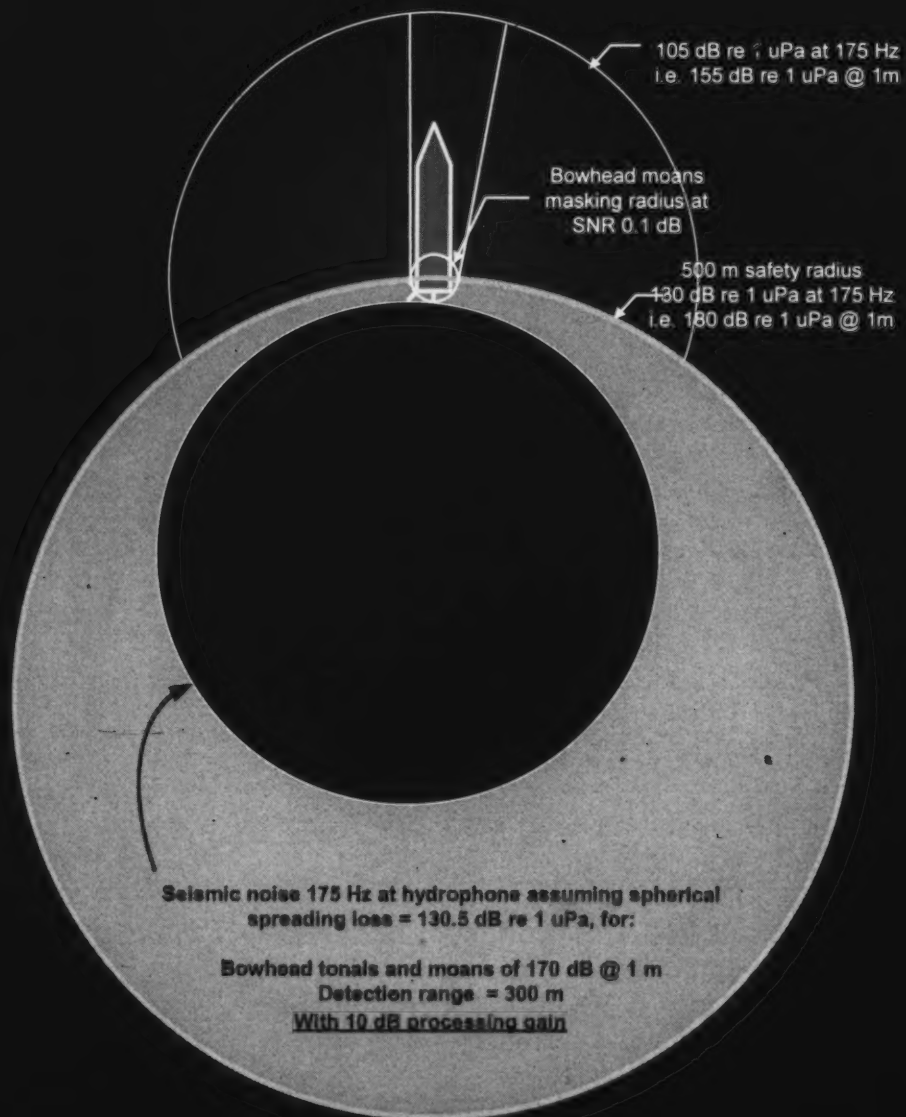


Figure 7. As in Fig. 6 but for the effect of airgun noise.

Figure 7. Comme à la Fig. 6 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

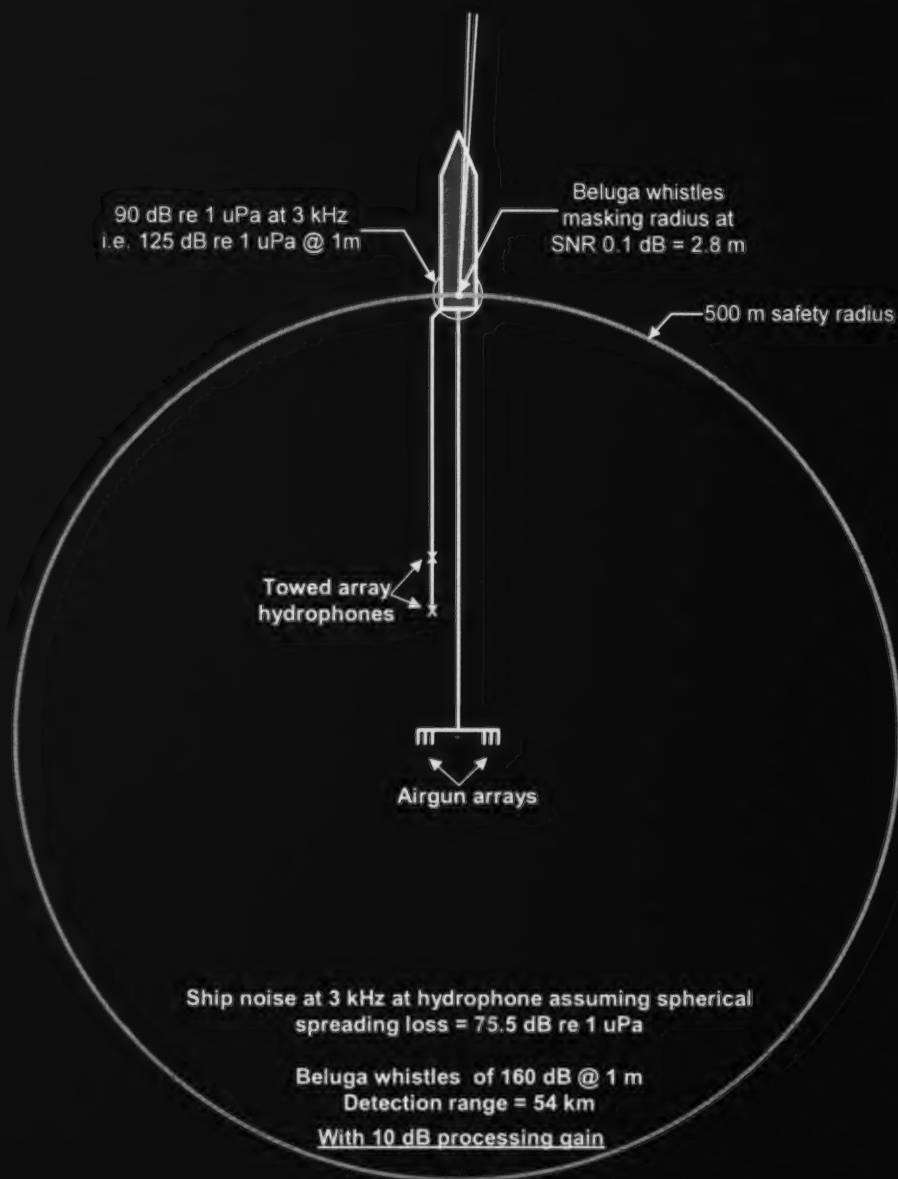


Figure 8. Example of the effect of ship noise on the detection of beluga whistles in the exclusion zone with a 10-dB processing gain during an airgun seismic survey from a PAM configuration as illustrated in Fig. 2.

Figure 8. Exemple de l'effet du bruit du navire sur la détection des sifflements de bélugas dans la zone d'exclusion avec un gain de traitement de 10 dB lors d'un relevé sismique par canons à air à l'aide d'une configuration PAM comme illustrée à la Fig. 2.

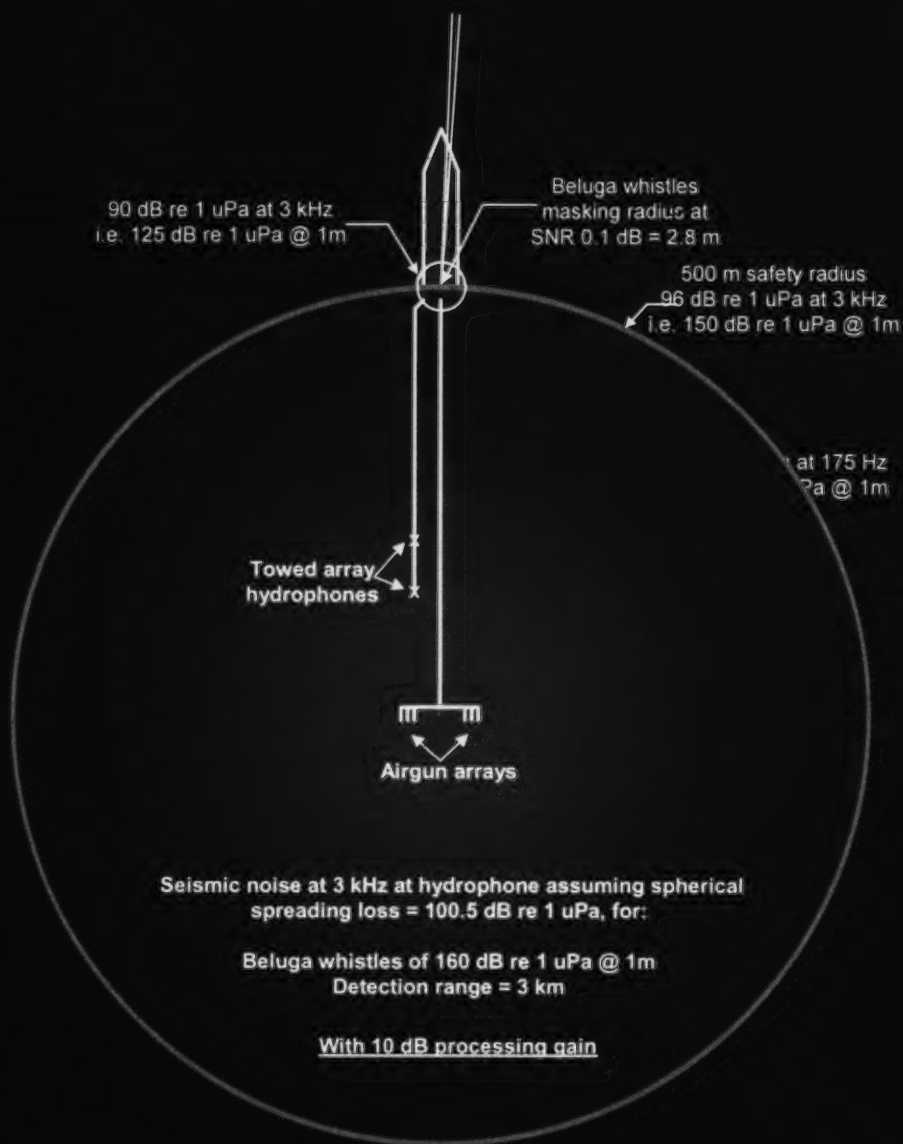


Figure 9. As in Fig. 8 but for the effect of airgun noise.

Figure 9. Comme à la Fig. 8 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

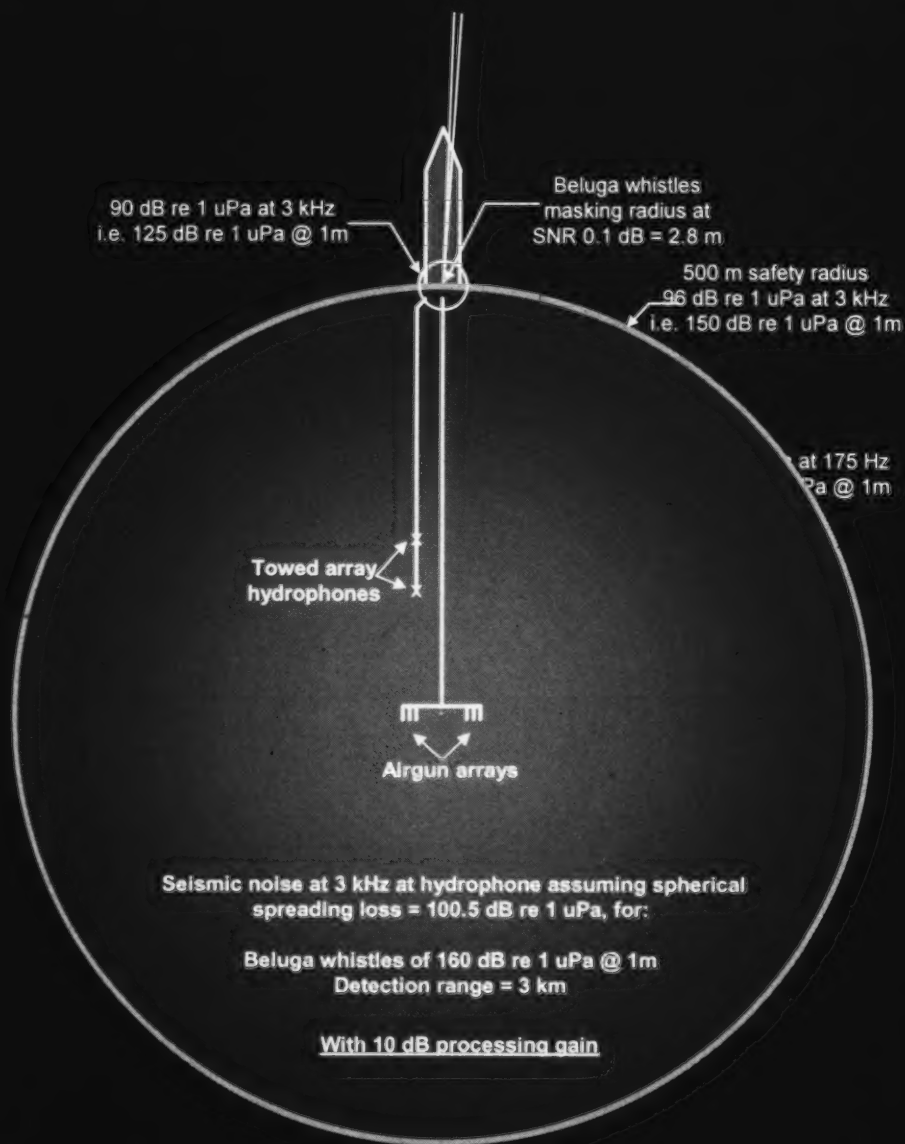


Figure 9. As in Fig. 8 but for the effect of airgun noise.

Figure 9. Comme à la Fig. 8 mais pour l'effet du bruit des canons à air.

